

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA EM ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

**Revista Internacional TECH ITT – Estruturas e Construção (by Construlink)
35 (12), 25-36 (ISSN 1645-5576)**

ISABEL TORRES

Professora Auxiliar
(UC)
Coimbra

PAULINA FARIA

Professora Associada
(UNL)
Lisboa

GINA MATIAS

Bolseira de Investigação
(ITeCons)
Coimbra

SUMÁRIO

Sabe-se que aproximadamente 30% do material produzido pela indústria cerâmica é considerado desperdício e, frequentemente, depositado em aterro, com o impacto ambiental negativo que acarreta. Esta tem sido uma das grandes motivações para a crescente investigação que tem sido levada a cabo a fim de obter soluções viáveis para a sua reintrodução no processo produtivo. A viabilidade do uso de resíduos de material cerâmico tem vindo a ser avaliada, principalmente, na incorporação em betões ou em argamassas com base em cimento.

Na antiguidade e na ausência de pozolanas naturais, eram frequentemente utilizados resíduos cerâmicos moídos, atuando como pozolanas artificiais e conferindo algumas características hidráulicas e de durabilidade às argamassas de cal aérea. Tem-se efetivamente constatado que alguns pós resultantes de desperdícios de cerâmica de barro vermelho, nomeadamente os que foram sujeitos a tratamento térmico a temperaturas inferiores a 900°C e moídos em granulometria fina, podem funcionar como pozolanas artificiais em argamassas.

A introdução de resíduos de cerâmica em granulometria mais grossa nas argamassas, como agregado, pode também revelar-se vantajoso, na medida em que permite substituir parcialmente a areia normalmente utilizada. Assim sendo, o recurso aos resíduos de cerâmica pode ser muito vantajoso em três vertentes principais: a redução de resíduos a depositar em aterro, a redução da extração de rochas para serem utilizadas na produção de ligantes e de areias e a produção de argamassas com comportamentos melhorados.

Com o objetivo de analisar a viabilidade da introdução de resíduos de cerâmica em argamassas, que se pretendem sejam, essencialmente, adequadas como argamassas de substituição, tem vindo a ser desenvolvida investigação na Universidade de Coimbra em colaboração com a Universidade Nova de Lisboa. O trabalho que se apresenta neste artigo é uma pequena parte dessa investigação.

Toda esta investigação tem tido o apoio de um projeto de investigação financiado pela FCT.

ABSTRACT

It is known that approximately 30% of the material produced by the ceramic industry is considered waste and often deposited in landfills with all the negative environmental impact that this brings about. This has been one of the major motivations for the increasing research that has been carried out in order to obtain viable solutions for its reuse. The viability of using residues of ceramic material has been evaluated mainly for use in concrete or cement mortars.

In ancient times and in the absence of natural pozzolans, milled ceramic residues were often used incorporated into air lime mortars, acting as artificial pozzolans and conferring them some hydraulicity and increased durability. It has been verified that some powder resulting from waste red mud ceramics, particularly those that were thermally treated at temperatures below 900 ° C and milled into fine particles, can function as artificial pozzolan for mortars.

The introduction of ceramic waste in coarser grinding, acting as aggregate may also be advantageous since it allows to partially replace natural sand. Therefore, the use of waste ceramic can be very advantageous in three points of view: the reduction of waste landfilled, reducing the extraction of rocks for the production of binders and sands, and the production of mortars with improved behaviors.

In order to analyze the feasibility of introducing waste ceramics in mortars, which are intended to be essentially replacement ones, research has been developed at the University of Coimbra in collaboration with the New University of Lisbon. The work presented in this article is a small part of this investigation.

All this research has also been supported by a research project funded by FCT

1. INTRODUÇÃO

As argamassas para revestimentos de edifícios têm um papel fundamental no desempenho funcional e global do edifício no seu conjunto. Para preservar e recuperar o património edificado de uma forma correta é fundamental ter em consideração que as argamassas de substituição devem cumprir requisitos específicos e possuir propriedades e materiais constituintes semelhantes aos originalmente utilizados [1]. Deve também assegurar-se a compatibilidade com os suportes em causa e, dentro do possível, garantir a sua durabilidade, visto que uma má solução de reparação pode acelerar o processo de degradação da argamassa e do próprio suporte. A reversibilidade das intervenções deve também ser sempre assegurada [1].

As argamassas de cal aérea aplicadas em edifícios antigos possuem, frequentemente, pozzolanas que lhes conferem algumas propriedades hidráulicas [2], nomeadamente resíduos de cerâmica. Tem sido demonstrado por vários autores que as argilas, que fazem parte da composição de ladrilhos, telhas e tijolos de cerâmica de barro vermelho, quando submetidas a determinadas temperaturas de cozedura, demonstram elevada reatividade pozzolânica [3,4]. Por outro lado também a cerâmica branca contém na sua constituição caulinos que, quando sujeitos a determinado tratamento térmico, se transformam em metacaulinos, muito reativos em termos pozzolânicos [5]. A utilização de qualquer destes materiais pozzolânicos, após moagem, permite a redução de incorporação de ligante, se introduzidos em granulometria fina e também a otimização de características das argamassas, nomeadamente em termos de durabilidade, sem colocar em causa a necessária compatibilidade com edifícios antigos. Se os referidos resíduos forem introduzidos numa granulometria mais grossa poderão substituir parte do agregado, reduzindo, desta forma, a extração de areias.

O trabalho que tem vindo a ser desenvolvido engloba a caracterização de argamassas de cal aérea e hidráulica com incorporação de resíduos de cerâmica de barro vermelho e cerâmica branca [6]. Neste artigo apresentam-se os resultados obtidos nos primeiros trabalhos desenvolvidos: a caracterização de argamassas de cal aérea com incorporação de resíduos de telhas, tijolos e vasos [7,8,9,10].

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Caracterização dos materiais

Para proceder a esta caracterização a primeira tarefa desenvolvida foi a recolha de resíduos de cerâmica de diferentes fábricas de cerâmica da região centro. De entre eles foram selecionados resíduos de tijolos (B-brick), de telhas (T-tile) e de vasos (P-pot) que foram triturados num moinho de maxilas (figura 1) e passados no peneiro de 4mm de forma a não introduzir partículas de dimensão superior. Para a produção das argamassas, além dos resíduos foi utilizada cal aérea hidratada em pó (H100 da Lusical) e areia siliciosa lavada (de rio).



Figura 1. Resíduos utilizados e sua preparação

A tarefa seguinte foi a caracterização dos materiais utilizados. Determinou-se a baridade de todos os constituintes, de acordo com a norma NP EN 1097-3:2002 [11] (Tabela 1) de forma a possibilitar a definição dos traços volumétricos das argamassas para traços rigorosos em massa e as curvas granulométricas dos resíduos e da areia, de acordo com a norma EN 933-1: 2012 [12] (Figura 2).

Tabela 1 – Baridade dos constituintes

Material	Tijolo (B)	Telha (T)	Vaso (P)	Areia	Cal aérea hidratada
Baridade média (g/m^3)	1,10	1,17	0,99	1,54	0,36

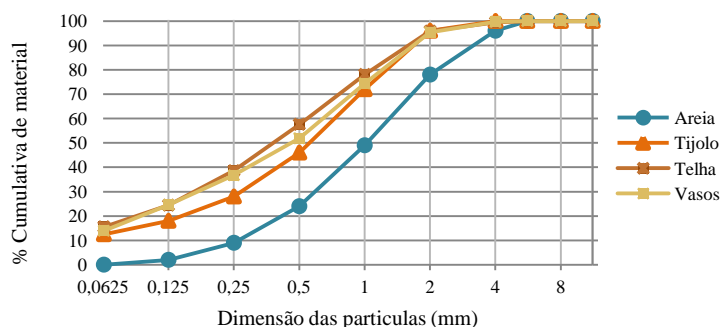


Figura 2 – Curvas granulométricas dos resíduos e da areia

Em termos da baridade dos materiais constituintes pode-se observar que os resíduos possuem valores muito semelhantes entre eles, inferiores à areia e superior ao valor obtido para a cal aérea.

Analisando a Figura 2 pode-se notar que a distribuição granulométrica dos resíduos após moagem é muito semelhante à da areia. A principal diferença é a presença, no caso dos resíduos, de uma maior percentagem de partículas com dimensão inferior a 0,063mm. Enquanto nos resíduos essa percentagem é de cerca de 10%, na areia ela é praticamente inexistente.

2.2 Composições e produção das argamassas

As argamassas foram formuladas com cal aérea e areia ao traço 1:3 em volume. Foi estudada uma argamassa de referência e 17 outras composições com incorporação de resíduos de cerâmica. Foram estudadas argamassas com os resíduos provenientes diretamente da moagem (resíduo integral), em substituição parcial da areia, nas percentagens de 20% (L-low) e 40% (H-High) da totalidade do volume do agregado. Foram igualmente produzidas argamassas com as mesmas percentagens de resíduo em substituição da areia, mas sem a fração de finos (remoção do material passado no peneiro 0,063 mm) – (grain G). Esta fração mais fina (dust – D) foi também incorporada em argamassas, mas neste caso em substituição do ligante, nas percentagens de 10% (L-low) e 20% (H-high).

Na tabela 2 apresentam-se todas as composições estudadas.

Tabela 2 – Composições estudadas

Designação	Cal aérea	Tijolo (B)		Telha (T)		Vaso (P)		Areia
		Pó	Grão	Pó	Grão	Pó	Grão	
Ref	1	-	-	-	-	-	-	3
LB	1	0,60		-	-	-	-	2,4
HB	1	1,20		-	-	-	-	1,8
LT	1	-	-	0,60		-	-	2,4
HT	1	-	-	1,20		-	-	1,8
LP	1	-	-	-	-	0,60		2,4
HP	1	-	-	-	-	1,20		1,8
LGB	1	-	0,60	-	-	-	-	1
HGB	1	-	1,20	-	-	-	-	1,8
LGT	1	-	-	-	0,60	-	-	2,4
HGT	1	-	-	-	1,20	-	-	1,8
LGP	1	-	-	-	-	-	0,60	2,4
HGP	1	-	-	-	-	-	1,20	1,8
LDB	0,9	0,1	-	-	-	-	-	3
HDB	0,8	0,2	-	-	-	-	-	3
LDT	0,9	-	0,1	-	-	-	-	3
HDT	0,8	-	0,2	-	-	-	-	3
LDP	0,9	-	-	0,1	-	-	-	3
HDP	0,8	-	-	0,2	-	-	-	3

G – resíduos em grão; D – resíduos em pó (que passam no peneiro 0,063mm); L – baixa percentagem (20%); H – alta percentagem (40%); B – tijolo; T – telha; P – vaso

As argamassas foram produzidas mecanicamente em laboratório, com base na norma EN 1015-2:1998 [13]. Foi introduzida água de modo a obter trabalhabilidade adequada.

2.3 Caracterização das argamassas

2.3.1 Estado fresco

Todas as argamassas foram preparadas com vista a obter uma consistência por espalhamento da ordem dos 150 mm. A determinação deste valor foi efetuada tendo por base a norma de ensaio EN 1015-3:1999 [14]. Foi registado o espalhamento obtido e a quantidade de água adicionada em cada mistura, através da relação mássica água/finos. Estes dados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Espalhamento e relação água/finos das argamassas estudadas

Designação	Ref.	LB	HB	LT	HT	LP	HP	LGB	HGB	LGT
Espalhamento	148	151	153	151	153	151	151	155	159	144
Água / ligante	2,2	1,9	1,9	2,2	1,7	2,0	1,9	1,7	1,7	2,0
Designação	HGT	LGP	HGP	LDB	HDB	LDT	HDT	LDP	HDP	
Espalhamento	154	147	156	154	149	142	142	150	156	
Água / finos	1,6	1,9	1,9	1,8	1,7	1,8	1,6	1,7	2,1	

2.3.2 Estado endurecido

Para caracterização no estado endurecido foram executados provetes circulares (106 mm de diâmetro interno e 15 mm de altura), para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água e provetes prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) para a determinação das características mecânicas, físicas e de comportamento face à água líquida.

Todas as argamassas foram condicionadas, durante 5 dias, nos moldes, a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $95 \pm 5\%$. Permaneceram durante mais 2 dias nos moldes, à mesma temperatura, mas a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$, de forma a permitir a sua desmoldagem no final desse período, de acordo com a norma EN 1015-11 [16]. Todas as argamassas permaneceram nestas condições, após desmoldagem e até à data de ensaio. Nos pontos seguintes são apresentados todos os resultados obtidos para a caracterização das argamassas formuladas. Os ensaios foram realizados em duas idades distintas: 60 e 120 dias. As idades escolhidas para caracterização tiveram em conta o facto de estar-se a analisar argamassas de cal aérea cujos períodos de cura são mais elevados do que as correntes argamassas de cimento.

2.3.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade é uma característica mecânica que indica a rigidez de um material sólido e pode ser definido como a relação entre a tensão normal e a correspondente deformação. A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à capacidade de absorver deformações, que são medidas através do módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado de acordo com a NP EN 14146:2008 [15], referente a pedra natural e cujo princípio de medição consiste em medir a frequência fundamental de ressonância de um provete colocado em

vibração longitudinal. A partir deste valor, do comprimento do provete, da sua massa volúmica e da aceleração da gravidade pode-se obter o módulo de elasticidade, em MPa, através da equação 1:

$$Edl = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot F_L \cdot \rho \cdot T \text{ [MPa]} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: L é o comprimento do provete, em mm; F_L é a frequência de ressonância fundamental longitudinal, em Hz; ρ é a massa volúmica do provete, em g/mm³ e T corresponde a um fator de correção associado ao raio de giração da secção e ao coeficiente de Poisson.

Na figura 3 são apresentados os resultados obtidos.

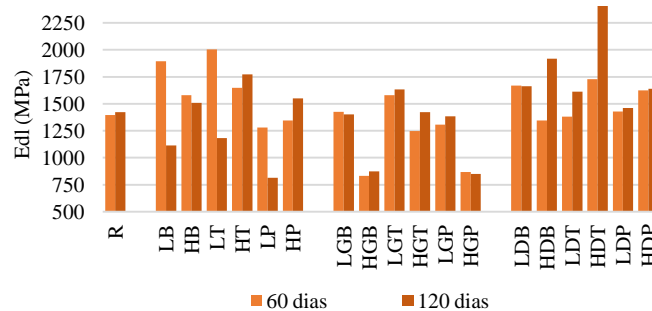


Figura 3 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 e 120 dias

Pode-se observar que enquanto para as argamassas com resíduo na sua forma integral (LB, HB, LT, HT, LP, HP) e na sua forma granular (LGB, HGB, LGT, HGT, LGP, HGP) o aumento da percentagem de incorporação levou a uma diminuição do módulo de elasticidade, no caso das argamassas com pó de cerâmica LDB, HDB, LDT, HDT, LDP, HDP) aconteceu o oposto.

2.3.3.2 Resistências à flexão e à compressão

As resistências mecânicas das argamassas são características com alguma importância no seu comportamento. De facto a resistência à fendilhação de uma argamassa é função, entre outros fatores, das tensões induzidas no seio da argamassa e da sua capacidade de resistência. A tendência para a fendilhação será tanto menor quanto menor for a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração. Quanto mais elevada for a relação entre as resistências à tração e à compressão, mais dúctil será a argamassa e, portanto, maior será a resistência às tensões introduzidas.

As resistências mecânicas foram determinadas de acordo com a EN 1015-11 [16]. A resistência à tração por flexão, em MPa, foi calculada pela equação 2:

$$R_t = 1,5 \frac{F_f \cdot L}{b^3} \text{ [MPa]} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: F_f é carga de rotura à tração por flexão, em N; L é a distância entre os apoios inferiores do provete, em mm; B é a largura da base do provete, em mm.

A resistência à compressão R_c , em MPa, é obtida pelo quociente da carga de rotura à compressão F_c , em N, pela área de aplicação da carga S, em mm². Nas figuras 4 e 5 apresentam-se os resultados obtidos.

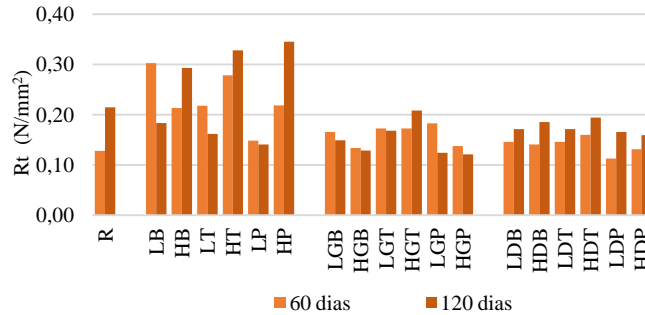


Figura 4 – Resistência à tração por flexão aos 60 e 120 dias

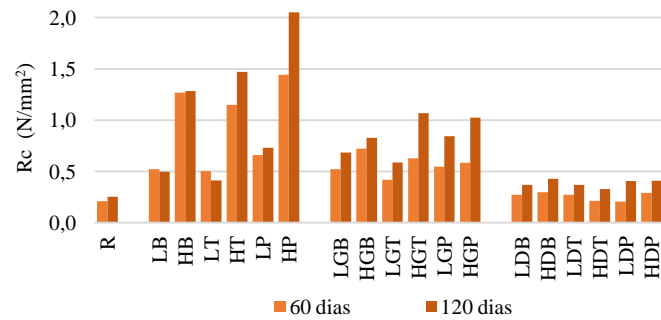


Figura 5 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias

Verifica-se que as argamassas com resíduo na forma integral apresentam, no geral, valores mais elevados que as restantes e maiores variações com o aumento do tempo de cura. Todas as argamassas com resíduos apresentam resistências à tração superiores à de referência. Existe uma tendência para o aumento da resistência à flexão ao longo do período de cura nas argamassas que contêm pó de cerâmica em substituição do ligante. Para as restantes não existe uma tendência definida, mas prevê-se o que mesmo venha a acontecer para idades mais elevadas.

As argamassas com a fração fina (D) apresentam resultados mais uniformes, não sendo observadas variações significativas associadas à quantidade de resíduo, sendo as argamassas com resíduo de vaso as que apresentam os valores mais baixos.

2.3.3.3 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

A massa volúmica pode ser definida como sendo a massa por unidade de volume e a porosidade aberta traduz a relação entre o volume total de poros abertos e o volume aparente dos provetes. Estas propriedades foram determinadas de acordo com a norma NP EN 1936: 2008 [17], para pedra natural. Calculou-se a massa volúmica aparente de cada provete, em kg/m³, através da equação 3:

$$MV = \frac{M_s}{M_{sat} - M_h} \cdot \rho_{rh} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Eq. 3})$$

A porosidade aberta, em %, foi calculada a partir da expressão:

$$P_{ab} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_h} [\%] \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: M_s é a massa do provete seco, em g; M_h é a massa do provete imerso em água, em g; M_{sat} é a massa do provete saturado, em g; ρ_{rh} é a massa volúmica da água à temperatura ambiente, em kg/m^3 . Os resultados obtidos para estas duas propriedades são apresentados nas figuras 6 e 7.

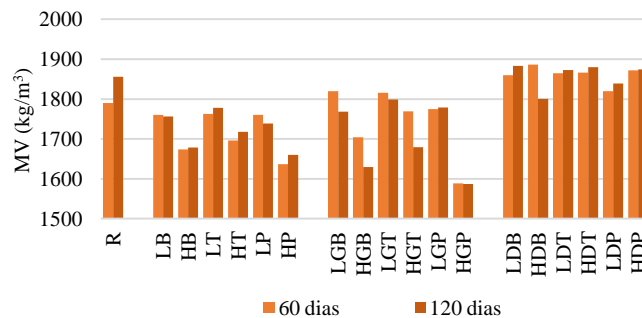


Figura 6 – Massa volúmica aparente aos 60 e 120 dias

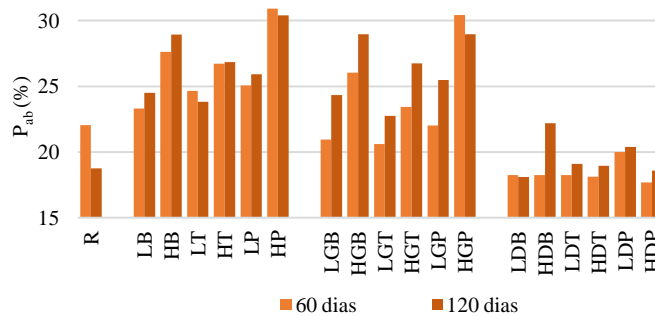


Figura 7 – Porosidade aberta aos 60 e 120 dias

Analisando os resultados pode-se dizer que a introdução de resíduos influencia a sua massa volúmica aparente: as argamassas com resíduo em pó (D) em substituição de volume equivalente de cal registam um aumento face à argamassa de referência e as restantes apresentam valores inferiores. Verifica-se também que o aumento da percentagem de resíduo se traduz na diminuição da massa volúmica aparente, sendo que o decréscimo é mais acentuado no caso das argamassas que contêm a fração grossa dos resíduos (G). De um modo geral, não são observadas diferenças significativas no que diz respeito ao período de cura.

Quanto à porosidade aberta verifica-se as argamassas com introdução de pó mantiveram os valores obtidos pela argamassa de referência, enquanto as restantes argamassas viram os seus valores aumentar substancialmente. Significa, por isso, que a presença da fração grossa dos resíduos tem uma

influência significativa na porosidade aberta das argamassas. Em relação ao aumento da percentagem de substituição verificou-se que implica o aumento da porosidade aberta.

2.3.3.4 Coeficiente de absorção de água por capilaridade e índice de secagem

Por definição pode-se dizer que o coeficiente de absorção de água por capilaridade de um material representa a massa de água absorvida por área do material em contacto com a água, devido à atuação das forças de sucção capilar. O ensaio foi realizado segundo algumas indicações da norma de ensaio EN 1015-18:2002 [18]. Contudo, uma vez que o tipo de argamassas analisado geralmente apresenta absorções bastante rápidas na primeira hora de ensaio e de modo a possibilitar a avaliação das diferenças de comportamento entre argamassas, foi também tida em conta a norma de ensaio EN 15801:2009 [19]. Os provetes foram secos até massa constante e as faces de maiores áreas foram seladas com filme plástico, de modo a garantir o movimento unidirecional da água. O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C_c) é dado pelo declive do troço inicial linear da curva obtida da variação de massa em função da raiz quadrada do tempo, e deve ser calculado através de uma regressão linear, usando pelo menos cinco pontos sucessivos desse troço inicial.

O índice de secagem (adimensional) foi determinado com o intuito de analisar a capacidade de secagem das argamassas e foi executado conforme o definido pela recomendação da RILEM n.ºII.5 [20]. Após saturação dos provetes (através do ensaio de capilaridade) estes foram colocados a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa e pesados periodicamente até estabilização da sua massa (variação entre pesagens inferior a 1 %). Traça-se a curva de secagem, que exprime a variação no tempo do teor em água, e determinado o índice de secagem de acordo com a equação 5:

$$I_s = \sum_{i=1}^n \left[(t_i - t_{i-1}) \frac{W_{i-1} + W_i}{W_{\text{máx}} t_f} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que: t_i é o tempo de ensaio i , em horas; W_i é o teor de humidade no instante i , em %; t_f é o tempo final do ensaio, em horas.

Nas figuras 8 e 9 apresentam-se os valores obtidos para estes dois ensaios.

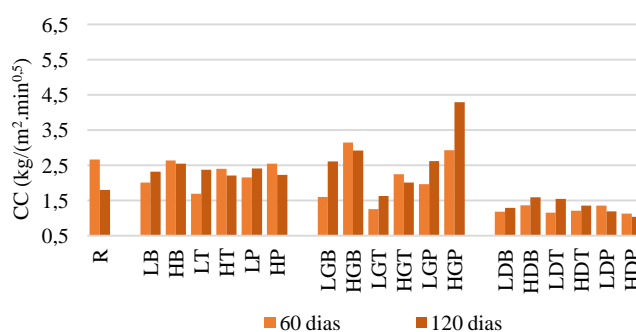


Figura 8 – Coeficiente de capilaridade aos 60 e 120 dias

Verifica-se que o coeficiente de capilaridade das argamassas com resíduos na forma integral e com fração grossa (G) apresentam alguns valores superiores à de referência e são tanto maiores quanto

maior é a percentagem de incorporação de resíduo. Ao longo do período de cura verifica-se um ligeiro aumento nas argamassas com a fração grossa. As argamassas com pó de cerâmica (D) registaram valores mais baixos que a de referência e não se observam grandes variações com o período de cura. Tendo em conta que o valor de IS traduz a capacidade de secagem das argamassas e que é tanto maior quanto maior for a dificuldade em concluir o processo, verifica-se que a incorporação de resíduos nas argamassas leva maior dificuldade de secagem em relação à argamassa de referência, sendo mais acentuada para as argamassas com resíduo na forma integral e menos acentuada para as argamassas com resíduo em pó.

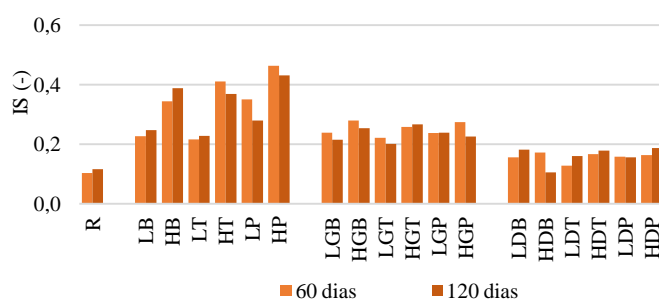


Figura 9 – Índice de secagem aos 60 e 120 dias

2.3.3.4 Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e camada de ar equivalente

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material homogéneo define-se como sendo a quantidade de vapor de água que o atravessa, por unidade de tempo e espessura, quando este está sujeito a uma diferença de pressão de vapor entre as suas faces. A determinação deste parâmetro baseou-se nos procedimentos da NP EN 1015-19: 2008 [21]. O ensaio consiste na colocação do provete entre dois ambientes a igual temperatura mas com pressões parciais de vapor diferentes, criando-se assim um gradiente de pressões entre as duas faces do provete e originando um fluxo de vapor de água constante através do mesmo. Calculando este fluxo de difusão e conhecendo a diferença de pressões parciais e as dimensões do provete pode-se determinar a permeabilidade ao vapor de água.

A “espessura da camada de ar equivalente” (S_D , em m) pode ser definida como sendo “a espessura de uma camada de ar em repouso que possui idêntica resistência à difusão de vapor de água que o elemento construtivo” e pode ser determinada pela equação 6:

$$S_D = \mu \cdot e \text{ [m]} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que: μ é o fator de resistência à difusão de vapor, adimensional; e é a espessura do provete, em m. Os valores obtidos estão representados nas figuras 8 e 9.

Da análise das figuras pode-se concluir que a introdução de resíduos reduz ligeiramente a permeabilidade ao vapor, com exceção de algumas composições com resíduo na forma granular. Verifica-se que um aumento na percentagem de substituição diminui a permeabilidade para as argamassas com resíduo na forma integral, aumenta no caso das argamassas com resíduo na forma granular e não tem grande influência nas restantes. Apenas nestas últimas é que se nota alguma influência do tempo de cura, aumentando ligeiramente a permeabilidade.

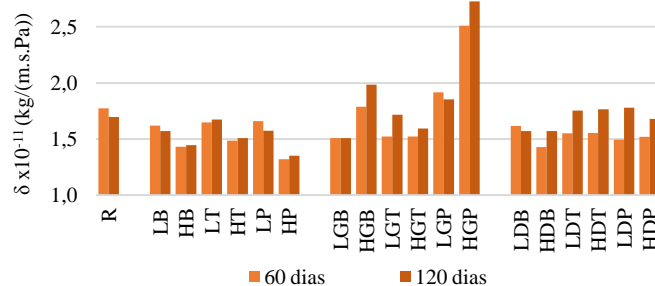


Figura 8 – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água aos 60 e 120 dias

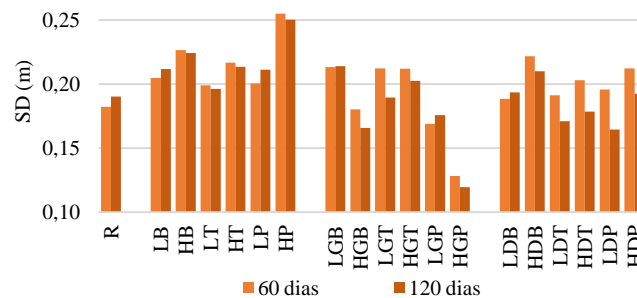


Figura 9 – Espessura da camada de ar equivalente aos 60 e 120 dias

3. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

Para uma análise global dos resultados e visto que se pretende que, essencialmente, estas argamassas possam ser utilizadas como argamassas de substituição para edifícios antigos, os valores obtidos para as diferentes características foram comparados com os valores recomendados por Veiga & Carvalho [22] e são apresentados na tabela 4. Estas gamas de características indicativas, a respeitar pelas argamassas de substituição, foram definidas tendo por base que as argamassas devem ser compatíveis com os suportes existentes e terem alguma durabilidade. Foram determinadas de acordo com a normalização aplicável, no caso a EN 1015-11:1999 [16] para as resistências mecânicas, a NF B 10-511:1975 [23] para o módulo de elasticidade dinâmico, a EN 1015-18:2002 [18] para o coeficiente de capilaridade e a EN 1015-19:2008 [21] para a espessura da camada de ar equivalente. No estudo presente os ensaios que se realizaram foram efetuados com base nas mesmas normas, exceto para a determinação do módulo de elasticidade, que foi realizado de acordo com a norma NP EN 14146:2008 [15]. Embora as normas utilizadas para a determinação do módulo de elasticidade não sejam as mesmas, baseiam no

mesmo princípio: medição a frequência fundamental de ressonância de um provete colocado em vibração longitudinal e, a partir da equação 1, determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 4 – Gama de características de argamassas, aos 90 dias, recomendadas para edifícios antigos [22]

Aplicação	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água	
	R_F (N/mm ²)	R_C (N/mm ²)	EdL (MPa)	S_D (m)	CC (kg/(m ² .min ^{0,5}))
Reboco exterior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	< 0,08	< 1,5; > 1,0
Reboco interior				< 0,10	-

R_F – resistência à tração por flexão; R_C – resistência à compressão; EdL – módulo de elasticidade dinâmico; S_D – espessura da camada de ar equivalente; CC – coeficiente de absorção por capilaridade

Os valores recomendados por Veiga & Carvalho e apresentados na tabela 4 são valores aos 90 dias e vão ser comparados com os obtidos aos 60 e 120 dias.

Quanto ao módulo de elasticidade pode-se concluir que as argamassas com introdução da fração fina do resíduo em substituição da cal são as que possuem valores mais próximas dos pretendidos e que apenas a argamassa HDT (argamassa com resíduos de telha numa percentagem de 20% de substituição) possui um valor dentro do intervalo pretendido. Todas as restantes possuem valores muito inferiores.

Para a resistência à tração verifica-se que as argamassas com resíduos na forma integral e a de referência cumprem o estipulado, enquanto todas as outras possuem valores ligeiramente mais baixos. Já para a resistência à compressão apenas algumas das formulações com introdução de pó de cerâmica não cumprem o intervalo indicado.

Para o comportamento face à presença de água a tabela 4 refere que o coeficiente de absorção de água se deverá situar entre 1,0 e 1,5 kg/(m² min^{0,5}) e a camada de ar equivalente inferior a 0,08 e 1,0 m, para rebocos exteriores e interiores, respetivamente.

No que se refere ao comportamento face à presença de água, para as argamassas estudadas vê-se que coeficiente de absorção de água apenas se enquadra nos valores estipulados para as argamassas com pó cerâmico na sua composição. Para todas as outras composições, incluindo a de referência, os valores obtidos são mais elevados. Para a camada de ar equivalente a situação ainda é pior, uma vez que nenhuma das argamassas cumpre o limite definido. Todas apresentam valores mais elevados.

4. CONCLUSÕES

Uma das formas de poder proceder à reutilização de materiais vulgarmente desperdiçados e depositados em aterro, como são os resíduos de cerâmica, e tendo em conta a sua potencialidade enquanto constituinte de argamassas de cal aérea, tem vindo a ser realizada uma extensa caracterização de argamassas de cal aérea com resíduos de tijolo, telha e vaso, em granulometrias e percentagens de incorporação distintas. Assim, neste primeiro trabalho de caracterização desenvolvido, foi possível analisar a influência da presença de finos de cerâmica que podem desempenhar a função de pozolanas em substituição parcial do ligante (cal aérea), bem como compreender qual o impacto da substituição

de agregados mais comuns, como a areia de rio, por agregados obtidos a partir da moagem de resíduos dos materiais cerâmicos mencionados (só em granulometria grossa ou incluindo também fração fina – resíduo integral).

No que diz respeito à caracterização mecânica, verificou-se que as argamassas com resíduos apresentam um bom comportamento no que diz respeito às resistências mecânicas, sobretudo em termos de resistência à compressão, sendo as argamassas com resíduo integral as que apresentam melhor comportamento. Pode admitir-se, por este motivo, que o pó de resíduos incorporados nas argamassas terá efetivamente alguma reatividade pozolânica. Os valores obtidos para os módulos de elasticidade são algo inferiores ao pretendido e tido como ideal. Neste parâmetro em especial, destacam-se as argamassas com resíduo de telha, o que poderá indicar que este material tem características que poderão potenciar o desempenho favorável de argamassas no que diz respeito a esta característica. O facto de o aumento das resistências mecânicas não ser acompanhado do aumento do módulo de elasticidade dinâmico poderá indicar a manutenção de alguma capacidade de deformabilidade destas argamassas, que poderá ser vantajosa do ponto de vista da aplicação destas argamassas.

Quanto ao comportamento face à presença de água, embora não seja o ideal para argamassas de substituição, os resultados obtidos permitem admitir que as formulações poderão ser afinadas, eventualmente com algumas adições que poderão permitir melhorar este comportamento.

Globalmente considera-se que as argamassas estudadas têm um comportamento bastante satisfatório, e que a inclusão de resíduos poderá melhorar o comportamento face ao mesmo tipo de argamassas só com cal aérea. As argamassas com incorporação do resíduo com granulometria integral demonstram ser as mais adequadas para o fim a que se destinam.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio conferido ao projeto EXPL/ECM-COM/0928/2012 - Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação. Agradece-se também à Lusical pela disponibilização da cal aérea H100. Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Veiga, M.R.et al., 2004. “Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos” - Coleção Edifícios 9. Lisboa: LNEC.
- [2] Gillot, C., 2014. “The use of pozzolanic materials in Maya mortars: New evidence from Río Bec (Campeche, Mexico)”. *Journal of Archaeological Science*, 47 (2014) 1e9
- [3] Baronio, G. & Binda, L., 1997. “Study of the pozzolanicity of some bricks and clays”. *Construction and Building Materials*, 11, pp.41-46.
- [4] Baronio, G., Binda, L. & Lombardini, N., 1997. “The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks”. *Construction and Building Materials*, 11, pp.33-40.

- [5] Charola E.; Faria-Rodrigues, P.; McGhie, A.; Henriques, F. (2005) "Pozzolan components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure". *Restoration of Buildings and Monuments*, 11 (2), pp.111-118.
- [6] Torres I. & Faria P. (2014) "Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de cal para reabilitação – Resultados preliminares de projeto". I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimentos, Coimbra, 5 e 6 de Junho de 2014 (CD).
- [7] Duarte, T., "Comportamento mecânico de argamassas de cal com resíduos cerâmicos" Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Julho de 2011.
- [8] Ferreira, T., "Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos," Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Setembro de 2011.
- [9] Silva, H. "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduo de cerâmica em granulometria fina" Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Janeiro 2012.
- [10] Tomás, A.L., "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica em substituição de parte do agregado" Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Julho de 2012.
- [11] IPQ, 2002. NP EN 1097-3:2002 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Caparica, Portugal.
- [12] CEN, 2012. EN 933-1:2012 - Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. Brussels, Belgium.
- [13] CEN, 1998. EN 1015-2:1998 - Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels, Belgium.
- [14] CEN, 2006. EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table); EN 1015-3:1999/A 1:2004; EN 1015-3:1999/A 2:2006. Brussels, Belgium.
- [15] IPQ, 2006. NP EN 14146:2006 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Caparica, Portugal.
- [16] CEN, 2006. EN 1015-11: 1999+EN 1015-11/A1:2006 - Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels, Belgium.
- [17] IPQ, 2008. NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica, Portugal.
- [18] CEN, 2002. EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels, Belgium.
- [19] CEN, 2009. EN 15801:2009 - Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels, Belgium.
- [20] RILEM, 1980. TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test 11.5 – Evaporation curve. *Materials & Structures*, 13, pp.204-07.
- [21] IPQ, 2008. NP EN 1015-19:2008 - Métodos de ensaio de argamassas para Alvenaria. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas. Caparica, Portugal.

- [22] Veiga, M.R. & Carvalho, F., 2003. Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar - Cadernos de Edifícios n.º 2. Lisboa: LNEC.
- [23] AFNOR – “Mesure du module d’élasticité dynamique” Norme Française Homologué, Paris, Abril 1975. NF B 10-511.



ISABEL TORRES
Professora Auxiliar
(UC)
Coimbra



PAULINA FARIA
Professora Associada
(UNL)
Lisboa



GINA MATIAS
Bolseira de Investigação
(ITeCons)
Coimbra